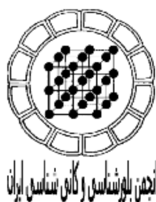
مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران

سال بیست و چهارم، شمارهٔ اول، بهار ۹۵، از صفحهٔ ۳ تا ۱۸



بلورشناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی گالن، کانسار سرب نخلک (اصفهان)

محمدعلی جزی، محمدحسن کریم‌پور*، آزاده ملک‌زاده شفارودی

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

(دریافت مقاله: ۹۳/۱۱/۶ ، نسخه نهایی: ۹۴/۲/۲۲)

چکیده: کانسار سرب نخلک یکی از قدیمی‌ترین و بزرگترین معادن سرب ایران در ۵۵ کیلومتری شمال‌شرق شهر انارک قرار گرفته است. کانسار نخلک به صورت چینه‌کران و دیرزاد در سنگ میزبان کربناتی کرتاسه بالایی دولومیتی شده جای گرفته است. ماده‌ی معدنی درونزاد شامل گالن و باریت بوده که در منطقه‌ی برونزاد با سروزیت همراه می‌شود. گالن به‌صورت درشت بلور و ریزبلور و با بافت جانشینی و پرکننده‌ی فضای خالی و بلوری کوبواکتاهدرال مشاهده می‌شود. ادخال کانی‌های مستقل مانند فاهلور (سری تترائدریت-تنانتیت)، اسفالریت، پیریت و کالکوپیریت با اندازه چند میکرون تا چند ده میکرون حضور داشته که تنوع و فراوانی ادخال‌ها متفاوت است. تجزیه گالن به روش ICP-MS حضور عناصر کمیاب مانند نقره (۹۳۲ ppm)، آنتیموان (۳۴۲ ppm)، مس (۴۲۲ ppm) و آرسنیک (۹۱ ppm) را آشکار ساخته است که در میان آن‌ها نقره از همه مهم‌تر است. مقادیر بسیار پایین Bi و فراوانی Sb و As و نیز نسبت بالای Sb/Bi نشان دهنده‌ی تشکیل گالن نخلک در دما و فشار پایین است. آنالیز نقطه‌ای نشان می‌دهد عناصر کمیاب به صورت ادخال درون گالن متمرکز شده‌اند. بر اساس ویژگی‌های کانی گالن و دیگر ویژگی‌های زمین‌شناسی، مدل کانی‌سازی نوع دره می‌سی‌سی‌پی برای کانسار سرب نخلک پیشنهاد می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: *نخلک؛ گالن؛ کوبواکتاهدرال؛ ادخال؛ ژئوشیمی؛ نقره.*

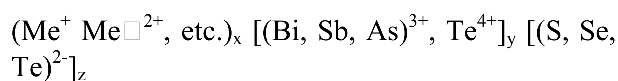
مقدمه

کانسار سرب نخلک به‌عنوان یکی از بزرگترین ذخایر سرب ایران، از دیر باز مورد استفاده و بهره برداری قرار گرفته است. در زمان ساسانیان توجه به ظروف نقره‌ای و صنعت نقره‌کاری، رونق معدنکاری را در پی داشته است. از آنجایی‌که ایرانیان، بیشتر نقره را همراه با کانسنگ سرب یافته بودند، کانسنگ‌های سرب نقره‌دار همچون کانسنگ کانسار نخلک مورد توجه ویژه قرار گرفته است [۲،۱]. در این پژوهش خصوصیات بلورشناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی گالن به عنوان کانه اصلی کانسار نخلک مورد بررسی قرار گرفته است. به‌طورکلی گالن‌های نقره‌دار هم از نظر ارزش اقتصادی و هم از نظر پژوهشی مورد توجه هستند. عناصر اصلی موجود در گالن شامل Ag، Bi، Sb است [۳]. به‌طور کلی گالن‌های نقره‌دار را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد: ۱) وابسته به زوج Ag-Sb؛ ۲) مرتبط با زوج Ag-Bi [۴]. عناصر فرعی و کمیاب موجود در گالن یا نتیجه‌ی جانشینی و ایجاد محلول جامد (Solid Solution) و یا به دلیل حضور ادخال کانی‌های دیگر و یا ترکیبی از هر دو حالت است [۵].

جانشینی نقره به جای سرب با وجود شباهت در شعاع یونی (Pb^{2+} = 1.20 Å, Ag^{+} = 1.26 Å)، با محدودیت مواجه است.

*نویسنده مسئول، تلفن - نمابر: ۰۵۱-۳۸۷۹۷۲۷۵، پست الکترونیکی: karimpur@um.ac.ir

برای غلبه بر محدودیت جانشینی نقره، حضور دو عنصر آنتیموان (Sb) و بیسموت (Bi)، نقش مهمی دارند ؛ به‌طوری کاتیون به آنیون را به تعادل رسانیده و نقره می‌تواند تمرکز بیشتری در گالن داشته باشد [۶]. شکل دیگر تمرکز عناصر، و بویژه نقره در گالن، حضور به‌صورت کانی‌های ادخال به شکل پراکنده و بی نظمی است [۷]. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سولفیدهای نقره (مانند آرژنتیت) کمی درون گالن محلول بوده حال آنکه سولفوسالت‌ها (مانند سری تترائدریت-تنانتیت) از حلالیت بیشتری برخوردارند [۳]. سولفوسالت‌ها به عنوان زیر گروهی از سولفیدها به‌عنوان مهم‌ترین کانی‌های اولیه‌ی نقره‌دار در پوسته‌ی زمین شناخته شده‌اند [۸]. این کانی‌ها دارای ترکیب پیچیده‌ای هستند که شکل کلی آن به صورت زیرتعریف شده است:



$$(Me^{+}\ Me\square^{2+},\ etc.)_x\ [(Bi,\ Sb,\ As)^{3+},\ Te^{4+}]_y\ [(S,\ Se,\ Te)^{2-}]_z$$

در این تعریف Me و □Me فلزات مختلف هستند [۹]. از نظر کانی‌سازی سولفیدهای حاوی Bi در گستره‌ی کانسارهای با دمای بالای گرمابی، سولفیدهای حاوی Sb در گستره‌ی دمای متوسط و کانسارهای حاوی As در گستره‌ی کانسارهای با دما پایین متبلور می‌شوند [۴،۱۰].

کانسار نخلک در فاصله ۱۲۰ کیلومتری شمال‌شرق نایین، ۵۵ کیلومتری شمال شرق انارک و در استان اصفهان با موقعیت جغرافیایی طول ۵۳° ۵۰' شرقی و عرض ۳۳° ۳۴' شمالی قرار گرفته است. تاکنون بررسی‌های متفاوتی در مورد خصوصیات زمین‌شناسی و کانی‌سازی نخلک صورت پذیرفته که از آن جمله گزارش هولزر و قاسمی‌پور [۱۱]، شارپوسکی و همکاران [۱۲]، رمانکو و همکاران [۱۳]، رسا [۱۴] و جزی و شهاب‌پور [۱۵] است. گالن کانسار نخلک و نیز دیگر کانسارهای سرب و روی ایران، به عنوان بخش مهمی از ماده‌ی معدنی، کمتر مورد توجه قرار گرفته و کمبود بررسی‌های بلورشناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمی در آن وجود دارد؛ چراکه که این بررسی‌ها می‌تواند به شناخت بهتر زمین‌شناسی اقتصادی این کانسارها کمک کند.

روش بررسی

پس از بازدید از کلیه‌ی رگه‌های معدنی، نمونه‌های مختلف از سرتاسر کانسار جمع‌آوری شدند. نمونه‌های مناسب برای تهیه‌ی مقاطع نازک (۸۰ نمونه)، صیقلی (۵۲ نمونه) و نازک صیقلی (۶ نمونه) انتخاب و بررسی‌ها روی آن‌ها صورت پذیرفت. تعداد ۲۰ نمونه آنالیز ICP-MS در آزمایشگاه ALS-Chemex کانادا از کانی گالن که به روش دستی و زیر میکروسکپ دوچشمی خالص‌سازی شده بودند انجام گرفت. براساس بررسی‌های میکروسکوپی و نیز نتایج آنالیز عناصر فرعی و کمیاب، تعداد ۷ نمونه مقطع صیقلی برای آنالیز ریزپردازشی انتخاب، و در مجموع ۳۲ نقطه از این مقاطع در آزمایشگاه شرکت کانساران بینالود تهران آنالیز شدند. دستگاه مورد استفاده از نوع Horiba-XGT-7200 با ولتاژ ۵۰[kV] بوده که قطر شعاع پرتو x آن ۱۰ و ۱۰۰ میکرون بوده و حد تشخیص عناصر از سدیم تا اورانیم در آن ۰/۰۱٪ و یا به عبارتی بالاتر از ۱۰۰ در یک میلیون بوده است.

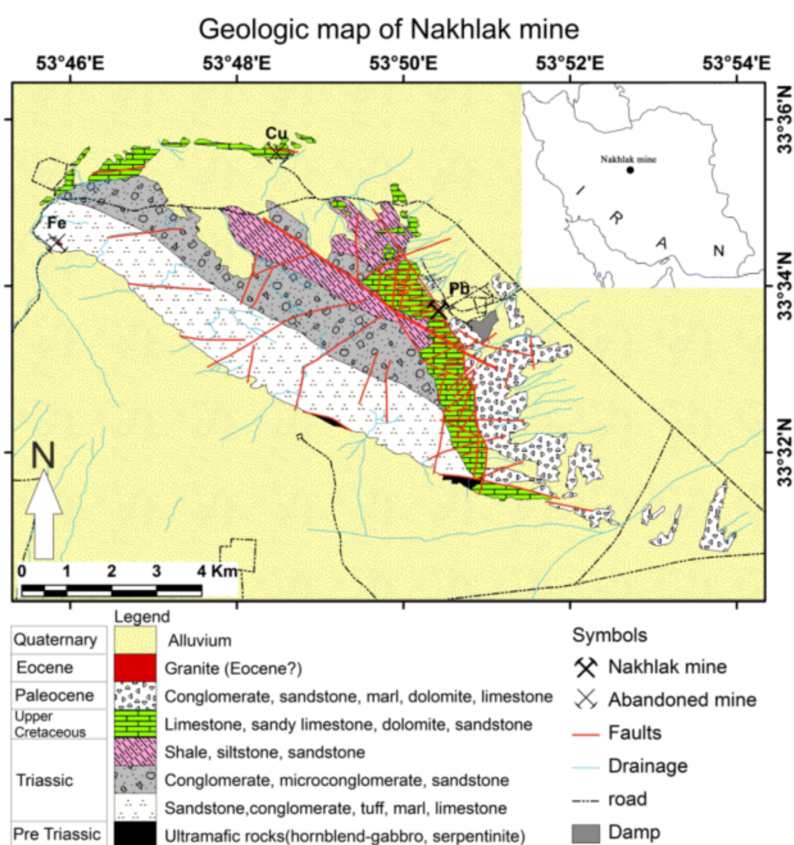
که جانشینی نقره به جای سرب همراه با عناصر آنتیموان و بیسموت ($Ag^{+} + (Sb,Bi)^{3+} = 2Pb^{2+}$)، بار و نسبت

زمین‌شناسی

کانسار نخلک در حاشیه‌ی شرقی رشته کوه نخلک و در جنوب کویر مرکزی ایران قرار گرفته است. به لحاظ تقسیم‌بندی‌های زمین‌شناسی کوه نخلک در خرده قاره‌ی ایران مرکزی و در بلوک یزد قرار گرفته است. چینه‌شناسی کوه نخلک به ترتیب سن از قدیم به جدید شامل: سنگ‌های الترامافیک قبل از تریاس، واحدهای سنگی تریاس (گروه نخلک)، واحد سنگی کربناتی کرتاسه بالایی (واحد صدر)، واحد تخریبی-کربناتی پالئوسن (واحد خالد) و دایک و استوک گرانیتی ائوسن است [۱۶] (شکل ۱).

واحد سنگ‌های کربناتی- آواری کرتاسه بالایی با ضخامت ۲۵۸ متر شامل کنگلومرا، آهک و دولومیت ماسه‌ای، ماسه‌سنگ آهکی، آهک ماسه‌ای-رسی و آهک ریفی بوده [۱۷] که در بردارنده‌ی ماده‌ی‌معدنی است. با توجه به چینه‌شناسی کربناتی کرتاسه بالایی سنگ میزبان، دگرسانی دولومیتی شدید، کانی‌سازی غیرهمزاد و چینه‌کران، عدم ارتباط با فعالیت‌های آذرین و همچنین بافت‌های پرکننده فضای خالی، ویژگی‌های کانی‌شناسی و شواهد ژئوشیمیایی، مدل کانی‌سازی نوع دره می‌سی‌سی‌پی برای کانسار سرب نخلک پیشنهاد شده است [۱۵].

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.1.3]



شکل ۱ نقشه زمین‌شناسی کوه نخلک (با تغییرات از ۱۵).

بحث و بررسی

کانی‌سازی

کانی‌سازی در کوه نخلک به صورت چینه‌کران (Stratabound) و ناهمزاد (Epigenetic) درون سنگ‌های کربناتی کرتاسه بالایی رخ داده‌اند که کنترل‌کننده‌های اصلی در جایگیری ماده‌ی معدنی شامل: عوامل چینه‌شناسی، عوامل سنگ‌شناسی و عوامل ساختاری هستند. ماده‌ی‌معدنی به شکل رگه‌هایی با شیب زیاد (۶۵ تا ۹۰ درجه به سمت شمال و جنوب) و با راستای تقریباً شرقی-غربی (آزیموت ۸۰ تا ۹۵ درجه نسبت به شمال) تقریباً به موازات یکدیگر قرار گرفته‌اند. تعداد رگه‌های معدنی کوچک و بزرگ شناسایی شده، بیش از ۵۰ رگه بوده که ضخامتی از چند سانتیمتر تا چند متر دارند که طول آن‌ها به ۴۰۰ متر نیز می‌رسد. فعالیت استخراجی زیرزمینی از گذشته در پنج طبقه (۵۰-، ۸۵-، ۱۲۵-، ۱۶۵- و ۲۰۰-) انجام شد، ولی اکنون تنها طبقات ۱۶۵- و ۲۰۰- متری فعال‌اند. معدنکاری بر اساس دو تونل شمالی- جنوبی بنا نهاده شده‌اند که رگه‌های شرقی- غربی را قطع می‌کنند.

ورود شاره‌های کانه‌دار به درون سنگ میزبان باعث دگرسانی دولومیتی نسبتاً شدیدی در سنگ میزبان شده که با کانی‌سازی جانشینی و بافت انتشاری همراه شده‌اند. گالن‌های جانشینی به‌صورت بی‌شکل تا خودشکل جانشین کانی‌های کربناتی شده است؛ با این‌وجود گاهی درون آن‌ها ذرات ماسه کوارتزی دیده می‌شوند که کانی گالن قادر به جانشین کردن آن‌ها نبوده است. پس از این مرحله، کانی‌سازی در مقیاس وسیع‌تر و درون فضای خالی و به صورت بافت برشی و قشری ادامه یافته است. گالن و باریت تشکیل دهنده‌های اصلی و اولیه ماده‌ی معدنی بوده که در منطقه‌ی برونزاد کانی سروزیت به‌عنوان کانی ثانویه اصلی این دو کانی را همراهی می‌نماید. گالن در مرحله‌ی اول کانی‌سازی به‌صورت ریزبلور و نازک لایه به صورت قشری به روی تمامی برش‌ها و سطوح شکاف‌ها و فضاهای خالی حضور داشته که به دلیل کاهش ناگهانی دما و واکنش سریع شاره‌های کانسار ساز در اثر برخورد با سنگ میزبان نهشته شده است. دیگر کانی‌های اولیه، کمیاب بوده و تنها به صورت ادخال درون گالن حضور دارند که از آن جمله

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.1.3]

عبارتند از پیریت، کالکوپیریت، اسفالریت و سولفوسالت. کانی-های برونزاد فرعی و کمیاب شامل: انگلزیت، پلاتنریت (PbO_2)، مازیکوت (PbO)، ولفنیت ($PbMoO_4$)، کوولیت، مالاکیت، کالکانتیت، میمتیت ($Pb_5(AsO_4)_3Cl$)، مینیوم (Pb_3O_4) و اکسیدهای آهن و منگنز می‌شوند. علاوه بر باریت، به مقدار کمتر کلسیت و دولومیت به عنوان کانی‌های باطله درکانسار حضور دارند.

بررسی کامل‌ترین دنباله‌های کانیایی در بافت‌های قشری نشان می‌دهد که گالن در ۳ برهه‌ی زمانی (Interval) و باریت در دو برهه زمانی تشکیل شده‌اند (شکل ۲). ایجاد این بافت به دلیل تغییرات فیزیکوشیمیایی به صورت بازخوردی (Feedback) در هنگام رسوب‌گذاری بوده که حاصل آن تغییرات در ته‌نشست کانی‌ها است. اصلی‌ترین عامل فیزیکوشیمیایی تغییرات گریزندگی اکسیژن (fO_2) بوده به طوری‌که با بالا بودن گریزندگی اکسیژن کانی باریت تشکیل و در نتیجه اکسیژن مصرف می‌شود، پی‌آمد آن کاهش اکسیژن در شاره‌ی کانه‌دار و ایجاد محیط احیایی مناسب برای تشکیل گالن است و این چرخه تا رسوب‌گذاری کامل شاره ادامه دارد [۱۸].

بلورشناسی گالن نخلک

گالن نخلک به صورت بی‌شکل تا شکل‌دار و به اندازه‌ی چند ده میکرون تا ۱۰ میلیمتر تشکیل شده است. گالن‌های درشت‌بلور بیشتر به صورت پرکننده‌ی فضای خالی و گالن‌های ریزبلور به شکل سیمان بین قطعات سنگ میزبان برشی حضور دارند. حضور سولفیدها در اندازه‌های ریز و درشت می‌تواند به سرعت متفاوت اختلاط شاره‌های کانسارساز با هم نسبت داده شود [۱۹]؛ با این حال عواملی مانند فضای رشد و تعداد و سرعت هسته‌زایی نیز در اندازه‌ی بلورها موثر است. کانی گالن دارای سیستم بلوری مکعبی همانند هالیت ($NaCl$) است. در یک بلور گالن دو سطح مکعبی $a\{100\}$ و نیز سطح هشت‌وجهی $o\{111\}$ قابل توسعه یافتن است؛ در نتیجه بلورهای با مشخصات متفاوت و به شکل‌های مکعبی هشت‌وجهی و نیز به شکل‌های ترکیبی همانند کوبو-اکتاهدرال مشاهده می‌شود [۲۰].

Minerals	Hypogene mineralization: Replacement	Hypogene mineralization: Open space filling	Supergene mineralization
Dolomite	▬▬▬	········	
Galena	········	◆◆◆	
Barite	········	◆◆	
Pyrite		········	
Sphalerite		········	
Calcopyrite		········	
Fahlore		········	
Cerrusite			▬▬▬
Anglesite			········
Covellite			········
Malachite			········
Mimetite			········
Wulfenite			········
Minium			········
Plattnerite			········

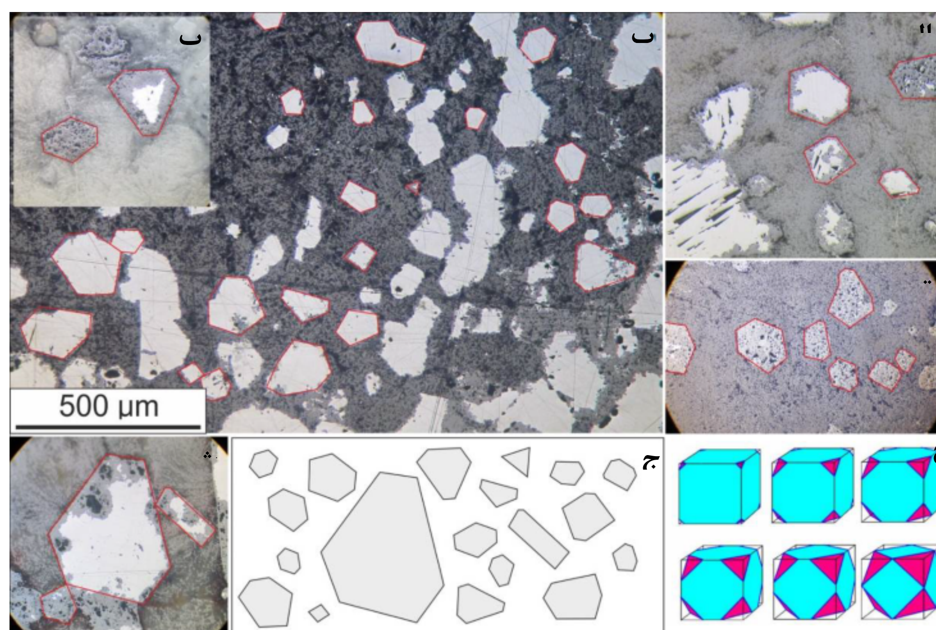
شکل ۲ دنباله‌ی پاراژنزی کانی‌های اصلی و فرعی کانسار نخلک.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.1.3]

بلورهای گالن کانسار نخلک موجود در فضای خالی به دلیل بالا بودن شدت فرایندهای برونزاد به سروزیت تبدیل شده‌اند و علیرغم جستجوها، بلور گالن با سطوح بلوری کامل یافت نشد؛ با این حال بلورهای گالن درون سنگ میزبان و نیز در زمینه باریت به شکل سالم وجود داشت که می‌توان شکل بلوری گالن را تصویرسازی کرد (شکل ۳). بررسی‌های بلورشناسی نشان می‌دهد که گالن معدن نخلک بیشتر از نوع ترکیبی مکعبی هشت‌وجهی است.

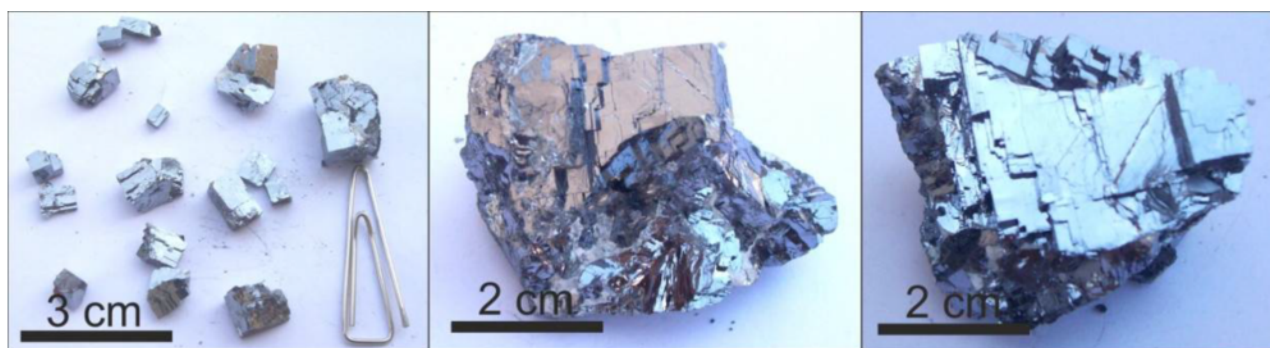
بلورهای گالن کانسارهای نوع دره‌ی می‌سی‌سی‌پی منطقه ویبرنوم ترند (Viburnum Trend) واقع در میسوری آمریکا، به عنوان بزرگترین تولیدکننده‌ی سرب جهان، دارای هر دو شکل مکعبی و هشت جهی و نیز شکل‌های ترکیبی (مکعبی-هشت وجهی) هستند [۲۲،۲۱]. نکته جالب در مورد شکل‌های بلورشناسی گالن این است که این شکل‌ها از نظر ترکیب شیمیایی تفاوت قابل توجهی با یکدیگر دارند. این نکته نشان می‌دهد که فرم بلوری در گالن می‌تواند متاثر از برخی فاکتورها همچون دمای تشکیل و نیز ژئوشیمی محلول باشد. مهم‌ترین عامل ژئوشیمیایی به حضور یا عدم حضور Bi نسبت داده می‌شود، به طوری‌که حضور Bi در گالن هشت‌وجهی، به نقش مهم این عنصر در پایدار کردن شبکه هشت‌وجهی اشاره دارد [۲۰]. مقدار این عنصر در گالن نخلک چنانکه در ادامه در بخش ژئوشیمی بیان خواهد شد، بسیار ناچیز است.

عامل اصلی در حضور این عنصر دما است به طوری‌که سولفیدهای حاوی Bi بالا در گستره‌ی کانسارهای دمای بالا قرار داشته که گالن‌های وابسته به اسکارن و آتشفشانی از این نوع هستند [۴]؛ همچنین در کانسارهای نوع MVT تغییرات زیادی در محتوای Ag و Bi با شکل بلوری وجود نداشت که نشان می‌دهد، دیگر فاکتورها به ویژه دما دارای اهمیت بالایی از نظر ایجاد شکل بلور خاص در گالن هستند [۲۳]. بررسی‌های اخیر دماسنجی روی شاره‌های درگیر در کانسار نخلک نشان می‌دهد، دمای کانسار نخلک در گستره‌ی کانسارهای نوع دره‌ی می‌سی‌سی‌پی قرار دارد. دمای تشکیل کانسارهای MVT بین ۵۰ تا ۲۵۰ درجه‌ی سانتیگراد بوده، با این حال اغلب دماها بین ۹۰ تا ۱۵۰ درجه‌ی سانتیگراد است [۲۴]. همچنین از نظر رخ یا جداشدگی، دو نوع رخ یا جدایش هشت‌وجهی و چاروجهی در کانی گالن مشاهده می‌شوند. رخ یا جداشدگی برای گالن کانسار نخلک مطلقاً از نوع مکعبی بوده و اثری از رخ هشت-وجهی در آن دیده نمی‌شود (شکل ۴). والستروم [۲۵] رخ یا جداشدگی هشت‌وجهی در گالن را در ارتباط با محتوای بیسموت آن می‌داند. جانشینی Bi به جای Pb در شبکه‌ی بلوری گالن باعث ایجاد پیچ و تاب در شبکه‌ی بلوری هشت-وجهی و کوبواکتاهدرال می‌شود که تفاوت در شعاع یونی Pb^{2+} و Bi^{3+} می‌تواند به عنوان عامل پیچ و تاب شبکه بلوری در نظر گرفته شود [۲۰].



شکل۳ الف، ب، پ، ت، ث: حضور بلورهای گالن در زمینه باریت و در برش‌های مختلف که به ترتیب فراوانی دارای سطوح ۶، ۴، ۸، ۵ و ۳ ضلعی است. ج: شکل ایده‌آل بلورهای گالن به صورت شکل‌های چند ضلعی. چ: شکل ایده‌آل مکعبی تا شکل کوبو-اکتاهدرال، که این فرم‌های بلوری به شکل چند ضلعی در برش‌هایی از گالن نخلک مشاهده می‌شود (مقیاس برای همه عکس‌ها یکسان است).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.1.3]



شکل ۴ انواع رخ و جداشدگی در کانی گالن نخلک که بصورت کاملا مکعبی است.

کانی‌شناسی گالن نخلک

گالن مهم‌ترین کانه‌ی سولفیدی اولیه کانسار نخلک است که به لحاظ اهمیت، شرح کانی‌شناسی آن در دو محیط درون‌زاد (Hypogene) و برون‌زاد (Supergene) بررسی می‌شود.

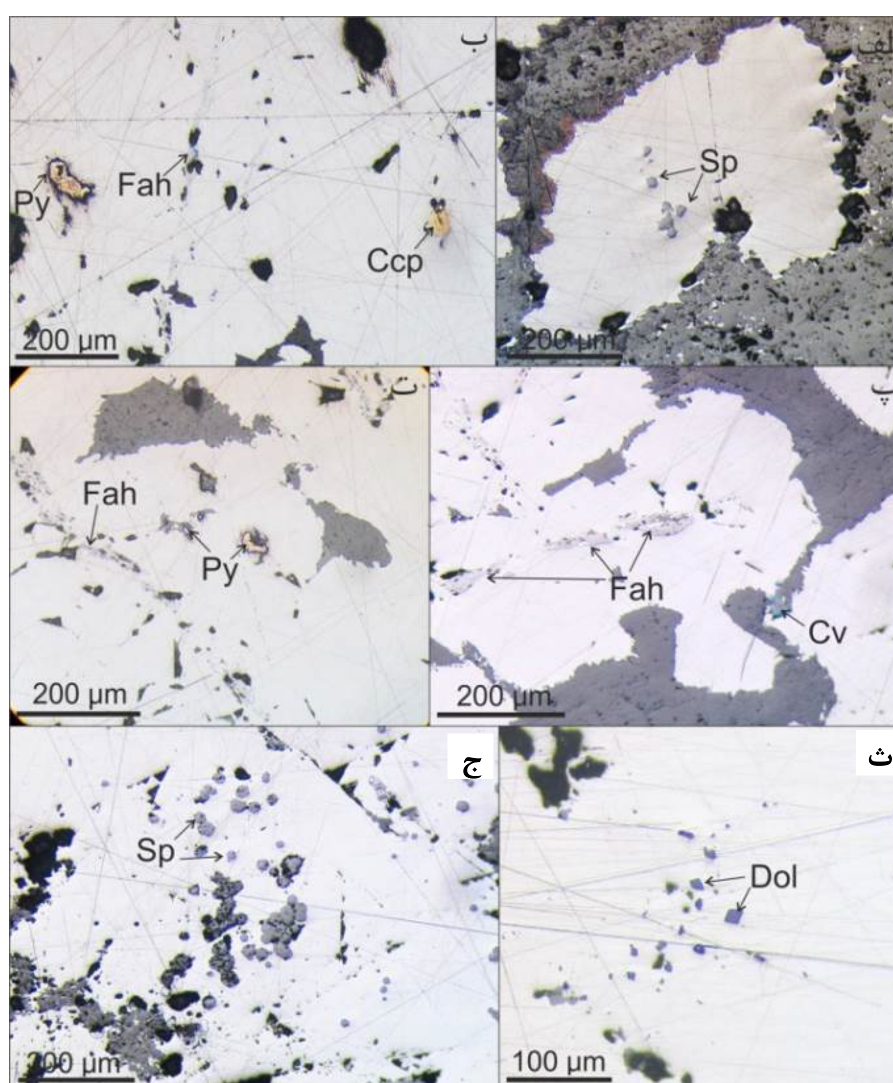
کانی‌شناسی درون‌زاد: کانی گالن به تنهایی در حدود ۹۹ درصد از کانه‌های سولفیدی کانسار نخلک را شامل می‌شود. دیگر سولفیدها تنها به صورت ادخال و در مقیاس میکروسکوپی در گالن حضور دارد که از جمله مهم‌ترین آن‌ها کانی‌های اسفالریت، کالکوپیریت، پیریت و سولفوسالت (فاهلور) هستند. با توجه به حالت منفرد و نیمه خودشکل‌کانی‌های پیریت، کالکوپیریت و اسفالریت، این کانی‌ها قبل از گالن زمینه تشکیل و به عبارت دیگر در گالن حبس شده‌اند. ادخال‌های سولفوسالت، حالت‌های شبه میرمکیتی نشان می‌دهند که ناشی از تشکیل آن‌ها به‌صورت آزاد سازی بوده است. حضور ادخال‌ها در تمامی نمونه‌ها یکسان نیست و از نظر نوع ادخال، مقدار و اندازه با یکدیگر تفاوت‌هایی دارند: به طوری که در گالن مرحله‌ی اول نسبت به دو مرحله‌ی دیگر کمترین ادخال مشاهده می‌شود. همچنین گالن‌های درشت بلور درون بافت قشری نسبت به گالن‌های ریز بلور درون بافت برشی معمولاً از ادخال‌های متنوع‌تر و با اندازه و فراوانی بیشتری برخوردار بوده که این تفاوت کانی‌شناسی، در ژئوشیمی این دو نوع گالن نیز تاثیرگذار بوده است (شکل ۵). ادخال‌ها در سطح گالن بی نظم و به صورت پراکنده توزیع شده‌اند که شرح مختصری از برخی از آن‌ها در ادامه آورده شده است.

اسفالریت: این کانی در اندازه، بین چند میکرون تا حداکثر ۱۰۰ میکرون به صورت نیمه خود شکل حضور دارد. پراکندگی این کانی در تمامی رگه‌ها یکسان نبوده و در رگه‌هایی مانند رگه‌ی ۳۳ از فراوانی بیشتری برخوردار است که نتایج ژئوشیمی نیز این مطلب را تایید می‌کند (شکل۵ الف، ج). **پیریت:** این کانی از جمله کانی‌های معمول در کانسارهای نوع MVT است [۲۵]؛ با این وجود این کانی تنها به صورت ادخال‌های کمیاب در حد چند میکرون تا حداکثر ۱۰۰ میکرون و به‌صورت بی‌-شکل درون گالن مشاهده می‌شود (شکل ۵ ب، ت). کانسارهای نوع MVT بر اساس محتوای Fe، به دو گروه آهن پایین و آهن بالا تقسیم شده که Fe آن‌ها بیشتر به صورت پیریت ظاهر می‌شود. از نظر ژنتیکی محتوای Fe در کانسارهای MVT با دمای تشکیل آن رابطه‌ی مستقیم دارد؛ بدین صورت که کانسارهای MVT با مقدار پایین پیریت نسبت به کانسارهای با پیریت بالا در دمای پایین‌تری تشکیل شده‌اند [۲۶]. **کالکوپیریت:** این کانی تنها به صورت ادخال‌های چند میکرون تا حداکثر ۵۰ میکرون، به عنوان کانی حامل Cu با فاصله‌ی زیاد در رده‌ی پایین‌تر از کانی‌های سولفوسالت قرار می‌گیرد (شکل ۵ ب). از نظر حضور و فراوانی، این کانی با سولفوسالت‌ها همبستگی نشان می‌دهد به‌طوری که در نمونه‌های دارای ادخال سولفوسالت، کالکوپیریت نیز مشاهده می‌شود. فراوانی پایین کانی کالکوپیریت نسبت به کانی‌های سولفوسالت به‌عنوان حامل‌های مس، احتمالاً به دلیل دمای پایین تشکیل کانسار است. **سولفوسالت (فاهلور):** این کانی به‌صورت ادخال‌های خاکستری روشن به صورت بی‌شکل و با اندازه‌ی چند میکرون تا حداکثر ۵۰ میکرون مشاهده می‌شوند. این کانی به‌صورت پراکنده و نیز زنجیره‌وار و به دنبال هم و شبه میرمکیتی در سطح گالن حضور دارند (شکل ۵ ب، پ، ت). با توجه به خصوصیات نوری و نیز کانی‌های ثانویه و ژئوشیمی کانی‌ها که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد، این کانی‌ها به احتمال زیاد وابسته به سری تترائدریت ($Cu_{12}Sb_4S_{13}$)-تنانتیت ($Cu_{12}As_4S_{13}$) هستند. این کانی‌ها با نام فاهلور (Fahlore)

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.1.3]

نیز شناخته شده‌اند و دارای فرمول شیمیایی متفاوت و نسبتاً پیچیده‌ای هستند [۲۷]. این کانی‌ها درون گالن‌های درشت بلور فراوانی بیشتری داشته و معمولاً در محیط برونزاد همراه با آن‌ها، کانی کوولیت نیز مشاهده می‌شود که ناشی از فرایند اکسایش است. علاوه بر ادخال‌های سولفیدی یاد شده، ادخال‌های خود شکل دولومیت نیز در گالن قابل مشاهده‌اند (شکل ۵ ث).

کانی‌شناسی برون‌زاد: عوامل زیادی در ایجاد فرایند برونزاد در کانسارهای سرب و روی با سنگ میزبان رسوبی دخیل هستند، همانند: کانی‌شناسی اولیه، موقعیت سطح ایستابی و نوسان‌های آن، سنگ‌شناسی سنگ میزبان، شیمی شاره و رژیم آب و هوایی. این عوامل مسئول تغییرات در Eh-pH و فشار موثر PO_2,PCO_2,PSO_2 روی منطقه‌ی کانی‌سازی هستند [۲۸]. محیط برونزاد در کانسار نخلک به دلیل شکستگی فراوان در سنگ‌های میزبان دارای سیستم باز و در تعادل با اتمسفر بوده و مقدار O_2 و CO_2 در آن مشابه اتمسفر است؛ همچنین به دلیل محیط گرم و خشک فعالیت بیولوژیک خاک در آن پایین بوده و pH متاثر از سنگ میزبان و ترکیب کانیایی است. که شرح برخی از این کانی‌ها در ادامه آورده شده است (شکل ۶).



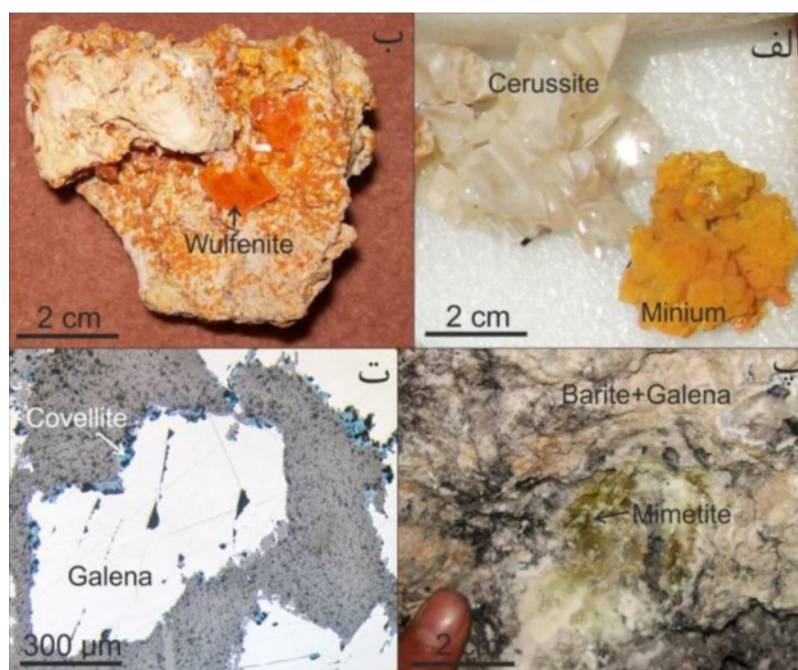
شکل ۵ کانی‌شناسی درون‌زاد نخلک، الف: ادخال اسفالریت در زمینه گالن؛ ب: ادخال پیریت، کالکوپیریت و فاهلور در زمینـه‌ی گـالن؛ پ: ادخـال فاهلور در حال تجزیه به کوولیت؛ ت: ادخال پیریت و فاهلور در زمینه‌ی گالن؛ ث: ادخال خودشکل دولومیـت درون گـالن؛ ج: ادخـال‌هـای گـرد از اسفالریت درون گالن. (Sp: اسفالریت؛ Py: پیریت؛ Ccp: کالکوپیریت؛Fah: فاهلور؛Cv: کوولیت؛ Dol: دولومیت).

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.1.3]

سروزیت: مهمترین کانی برون‌زاد سرب کانسار نخلک است که به دو شکل کاملاً متمایز رخ داده است: سروزیت ریز بلور که به‌صورت درجا جانشین گالن شده، و سروزیت درشت بلور به‌صورت پرکننده‌ی فضای خالی شکستگی‌ها و حفره‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۶ الف). در حالت میکروسکوپی سروزیت و به مقدار کمتر، انگلزیت با بافت‌های جانشینی همچون جانشینی خوردگی (Caries)، کناره‌ای (Boundary)، جانشینی شبکه‌ای (Network replacement)، اسکلتی، جانشینی در راستای رخ (Cleavage replacement) و جانشینی برجای مانده (Replacement relict texture) مشاهده می‌شود. در کانسارهای با سولفید آهن پایین، گالن می‌تواند به طور مستقیم به کربنات سرب اکسید شده و نیازی به فاز واسطه‌ی سولفات سرب ندارد. تاثیر سنگ میزبان کربناتی و نیز مقدار بسیار پایین کانی‌های اسیدی کننده محیط برونزاد، مانند پیریت، کالکوپیریت، آرسنوپیریت و اسفالریت آهن‌دار درغالب بودن سروزیت، در کانسار نخلک به خوبی قابل توجیه است.

انگلزیت: حضور این کانی در کانسار نخلک نسبت به سروزیت بسیار ناچیز بوده که علت این کمبود به دو دلیل است: ۱- حضور سنگ میزبان کربناتی کانسار نخلک و ۲-پایین بودن مقدار پیریت درون ماده‌ی معدنی و سنگ میزبان. سنگ میزبان کربناتی در فراهم کردن یون کربنات نقش اساسی داشته و پایین بودن مقدار پیریت قادر به ایجاد محیط اسیدی نیست. حضور سولفید آهن و اکسایش آن، محیط را اسیدی کرده و یون Fe^{3+} تولید می‌کند که در چنین محیطی ترجیحا انگلزیت تشکیل می‌شود [۲۹]. پلاتنریت (PbO_2): در سطوح تونل‌ها و کانی‌سازی‌های سطحی بیشتر به صورت پوششی سیاه رنگ حضور دارد، با این حال به صورت کمیاب، ریز بلور نیز مشاهده می‌شود. حضور کانی پلاتنریت به معنای محیط با اکسایش بالا است [۳۰].

مینیوم (Pb_3O_4): این کانی به رنگ نارنجی و با بافت‌های گل کلمی و بسیار کمیاب یافت می‌شود (شکل ۶ الف). این کانی در محیط کربناتی امکان تشکیل ضعیفی دارد [۳۰]. ولفنیت ($PbMoO_4$): از جمله کانی جالب و کمیاب در کانسار نخلک بوده که درون شکستگی‌ها و یا همراه با سروزیت مشاهده می‌شود (شکل ۶ ب). پس از اکسایش گالن، سرب و مولیبدن وارد محلول شده و پس از مهاجرت به صورت سروزیت و ولفنیت ته‌نشین شده است.



شکل ۶ کانی‌شناسی برون‌زاد نخلک. الف: نمونه‌های جداگانه نوعی سروزیت و مینیوم؛ ب: ولفنیت بلوری درون حفره‌های سنگ آهک میزبان؛ پ: پر شدگی حفره درون رگه به وسیله میمتیت؛ ت: جانشینی کوولیت در اطراف بلور گالن.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.1.3]

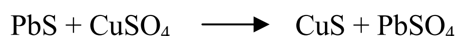
گلدشمیت [۳۱] در مورد حضور مولیبدن درون ساختار گالن تردید داشته و معتقد بود که این عنصر به صورت ادخال‌های ریز مولیبدنیت درون کانی حضور داشته است. مهاجرت یون مولیبدات در مراحل آخر برونزاد صورت می گیرد که با تشکیل ولفنیت درون فضای خالی به اثبات می‌رسد [۳۰].

این کانی در محیط برونزاد به صورت زیر تشکیل می‌شود [۳۲]:

$$PbS + MoS_2 + 2H_2O + 7O_2 \longrightarrow PbMoO_4 + 3SO_4^{2-} + 4H^+$$

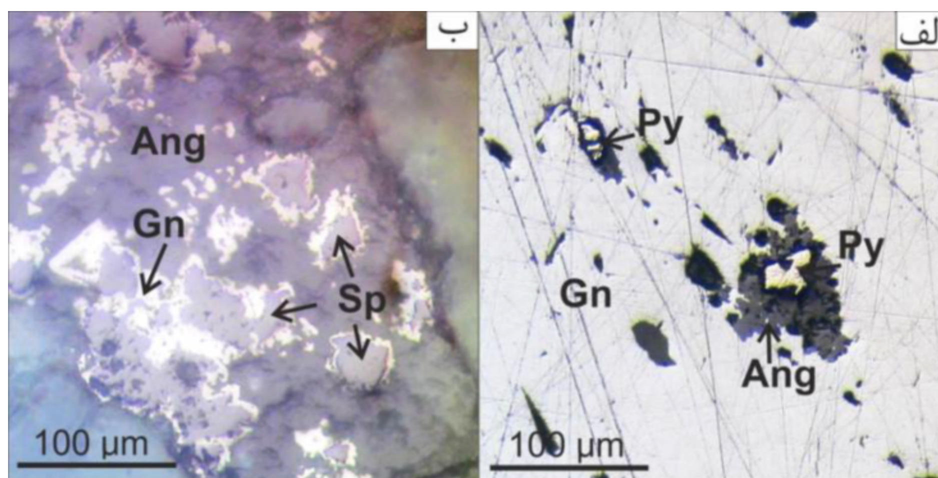
در منطقه اکسیدی حامل اصلی مولیبدن کانی ولفنیت است و می‌تواند مقادیری از عناصر تنگستن،کروم، وانادیوم، مس و کلسیم را در ساختار خود نگه دارد [۳۳]. حضور این عناصر به صورت فرعی در ولفنیت نخلک به اثبات رسیده است [۳۴]. کانی آرسنات‌دار مشاهده در محیط برونزاد کانسار نخلک، میمتیت ($Pb_5(AsO_4)_3Cl$) است که به رنگ سبز تا زرد متمایل به سبز مشاهده شده و خاستگاه آرسنیک در آن از ادخال‌های کانی تنانتیت درون گالن قابل تامین است (شکل ۶ پ).

کانی‌های کوولیت (CuS)، مالاکیت ($Cu_2CO_3(OH)_2$) و کالکانتیت ($CuSO_4,Cu(OH)_2$) از جمله کانی‌های ثانویه مس‌دار است که مس آن‌ها از ادخال‌های کالکوپیریت و تترائدریت-تنانتیت درون گالن تامین می‌شود. مس خارج شده از ساختار سولفیدهای مس اولیه با سولفات موجود در محیط ترکیب شده و به صورت زیر تشکیل کولیت می‌دهد [۳۲] (شکل ۶ ت). :



$$PbS + CuSO_4 \longrightarrow CuS + PbSO_4$$

در برخی از نمونه‌ها مجموعه‌ای از گالن در حال اکسایش همراه با کانی ادخال اسفالریت غیر اکسید شده و پیریت اکسیده مشاهده می‌شود (شکل ۷). این پدیده به‌دلیل فرایند جفت گالوانیک بوده که در کانی‌های سولفیدی به‌هم چسبیده رخ می‌دهد. در فرایند جفت گالوانیک یک جریان الکترون بین دو سولفید برقرار شده و یک سولفید به صورت کاتد (دهنده‌ی الکترون) و سولفید دیگر به صورت آند (گیرنده الکترون) عمل می‌کند و در نتیجه مادامی که سولفید کاتدی در حال اکسایش حضور دارد و الکترون می‌دهد، سولفید آندی دست نخورده باقی خواهد ماند. هر سولفید دارای یک پتانسیل ساکن (Rest Potential) بوده و در یک زوج سولفیدی کانی با مقدار پتانسیل ساکن بالاتر میل کمتری به اکسید شدن دارند. مقدار این پتانسیل برای سولفیدهای گالن، پیریت و اسفالریت در جدول ۱ آورده شده است. با توجه به این مقادیر در جفت‌های گالن-اسفالریت و گالن- پیریت، گالن به سبب پتانسیل کمتر میل به اکسید شدن دارد. در نمونه‌هایی از کانسار نخلک، گالن تحت اکسیداسیون به سروزیت و انگلزیت تبدیل شده در حالی که کانی اسفالریت به صورت دست نخورده باقی مانده است. با این حال این حالت در مورد ادخال‌های پیریت درون گالن نخلک مشاهده نمی‌شود.



شکل ۷ تاثیر فرایند جفت گالوانیک. الف: قرارگیری ادخال پیریت در زمینه گالن و ایجاد کانی انگلزیت در مرز بین دو کانی؛ ب: قرارگیری ادخال-های اسفالریت دست نخورده در زمینه گالن در حال اکسیداسیون شدید (Sp: اسفالریت؛ Py: پیریت؛ Ang: انگلزیت؛Gn: گالن)

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.1.3]

جدول ۱ مقادیر پتانسیل ساکن برای سولفیدهای گالن، پیریت و اسفالریت [۲۵، ۲۶، ۲۷].

سولفید	Won [35]	Karavaiko [36]	Da Silva et al. [37]
پیریت	-	۰٫۶۰	-
اسفالریت	~ ۰٫۲	۰٫۲۳	۰٫۳۷۲
گالن	~ ۰٫۱	-	۰٫۳۲۵

جریان گالوانیک بین کانی گالن و دیگر سولفیدها می‌تواند در اثر ایجاد سپر گالنی متوقف شود و در نتیجه سولفید مجاور گالن نیز اکسید شود، که این حالت در مورد جفت گالن-پیریت رخ داده است. پوششی از کانی‌های انگلزیت و در ادامه سروزیت روی سطح گالن ایجاد می‌شود که مانع از اکسایش بیشتر گالن می‌شود که این ویژگی گالن به سپر گالن (Galena Armouring) معروف است [۲۹]. چنانکه گفته شد حضور پیریت مهمترین نقش در تشکیل کانی انگلزیت دارا بوده و در واقع با اعمال فرایند اکسایشی، نخست جریان گالوانیک بین پیریت و گالن برقرار شده، ولی با پیشرفت فرایند، اکسیداسیون پیریت باعث بالا رفتن اسیدیته و نیز Fe^{3+} شده و در نتیجه کانی انگلزیت تشکیل شده که خود باعث توقف جریان گالوانیک می‌شود. توقف جریان گالوانیک باعث ادامه‌ی اکسید شدن پیریت خواهد شد. در این حالت به نمونه‌هایی با ادخال‌های پیریت در حال اکسیدشدن و اسفالریت دست نخورده برخورد خواهیم کرد (شکل ۷ الف، ب).

ژئوشیمی گالن نخلک

در زمان ته نشست ماده‌معدنی، عناصر کمیاب موجود در شاره-ی کانه‌دار به صورت محلول جامد و یا به صورت ادخال کانی‌های مستقل به درون کانی میزبان وارد می‌شوند [۳۸]. کانی گالن معمولاً دارای مقادیری از عناصر فرعی و کمیاب درون خود بوده که عنصر نقره به همراه آنتیموان و بیسموت از جمله مهم‌ترین این عناصر به شمار می‌روند. کانسارهای نوع MVT کانی‌شناسی و ژئوشیمی ساده‌ای دارند؛ با این حال در برخی مناطق دارای پیچیدگی هستند. کانسارهای ویبرنیوم ترند (Viburnum Trend) یکی از پیچیده‌ترین آن‌ها بوده و دارای تنوعی از سولفیدها و سولفوسالت‌های Cu، Co، Ni،Fe ، Ag و Sb هستند [۳۹]. آزمایش‌های ژئوشیمیایی (ICP-MS و XPMA) روی کانی گالن نخلک، نشان از تنوعی از عناصر فرعی بسیار ارزشمند است (جدول ۲). عنصر نقره مهمترین عنصر کمیاب درون گالن است، زیرا بالاترین مقدار فراوانی را بین دیگر عناصر دارد و به لحاظ اقتصادی نیز محصول جانبی (By-Product) ارزشمندی به شمار می‌رود. یکی از مهمترین سوال در مورد ژئوشیمی گالن نخلک چگونگی حضور نقره و دیگر عناصر کمیاب است. به همین برای گالن‌های مختلفی که آنالیز نقطه‌ای شدند (جدول ۲). نمونه‌ای از نتایج آنالیز ادخال‌ها در شکل (۸) آورده شده است. آنالیزهای نقطه‌ای نشان دادند که گالن زمینه، از نظر عناصر کمیاب فقیر بوده، حال آنکه در آنالیز گالن کل به روش ICP-MS و نیز آنالیز نقطه‌ای ادخال‌ها، تنوعی از عناصر کمیاب مشاهده می‌شود. ترکیب نتایج کانی نگاری، آنالیز ICP-MS و نیز XPMA نشان می‌دهد که ارتباط کاملاً مستقیمی بین تنوع و فراوانی ادخال‌ها و ژئوشیمی کل گالن وجود دارد.

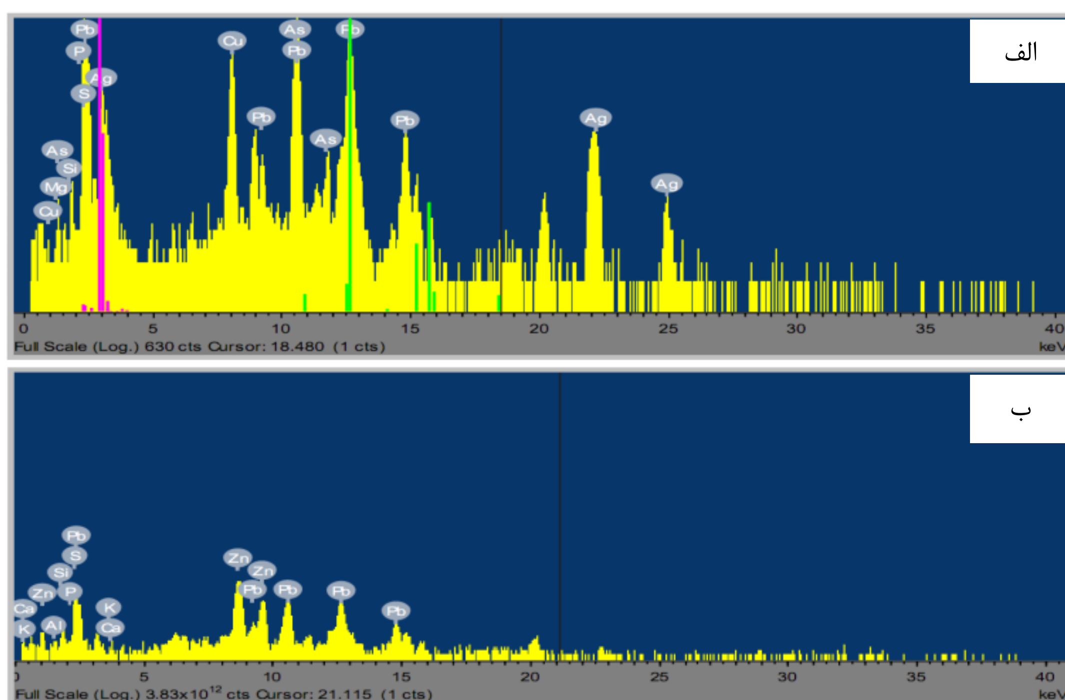
گالن زمینه در آنالیزهای نقطه‌ای در تمامی نمونه‌های ترکیبی تقریباً یکسان و فقیر از عناصر کمیاب نشان می‌دهد؛ به عبارت دیگر شکل اصلی حضور عناصر کمیاب در گالن نخلک به صورت ادخال کانی‌های مستقل بوده و حضور به صورت محلول جامد از اهمیت کمتری برخوردار است.

محتوای عناصر کمیاب درون گالن می‌تواند به ویژگی‌های ژنتیکی کانسار وابسته بوده و اطلاعاتی پیرامون شرایط تشکیل ماده‌ی معدنی ارائه کند. دو عنصر آنتیموان و بیسموت از عناصر اصلی جایگزین در گالن هست که به عنوان نشانگر شرایط کانی‌سازی از آن‌ها استفاده می‌شود. به اعتقاد مالاخوف [۴] بیسموت در گالن وابسته به کانسارهای وابسته به اسکارن و نوع آتشفشانی غنی بوده و به اعتقاد مارشال و جونسو [۲۳] آنتیموان به مقدار بالا در گالن کانسارهای با دمای پایین تمرکز می‌یابد.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.1.3]

جدول ۲ نتایج کانی‌نگاری و میانگین فراوانی عناصر مختلف گالن در رگه‌های نخلک بر اساس آنالیز ICP-MS و XPMA (خط تیره: اندازه‌گیری نشده، n.d: شناسایی نشده، ادخال‌های دارای علامت * مقداری گالن زمینه نیز وارد آنالیز شده است).

شماره رگه	شماره ICP	میانگین عناصر کمیاب در آنالیز گالن کل بر حسب (ppm)						مقاطع پالیش	بافت ماده معدنی	کانی‌ها		فراوانی ادخال‌ها	اندازه ادخال‌ها (μm)	عناصر در آنالیز نقطه ای برحسب (%)							
		Ag	As	Bi	Cu	Sb	Zn							Ag	As	Bi	Cu	Fe	Pb	Sb	Zn
۵	M1	۴۳۵	۵/۲	۰/۱۷	۲۹۰	۳۵۲	۱۳۷	V7A V9A R25 R1	قشری	گالن زمینه				n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
	M2	۲۶۰	۰/۲	۰/۰۶	۱۱۶	۱۷۳	۱۷			ادخال	*فاهلور	متوسط	۱-۳۰۰	۲۱/۴	۱/۲	n.d	۴/۵	n.d	۶۰	n.d	n.d
	M3	۲۷۵	۰/۴	۰/۰۶	۱۱۷	۴۳۷	۲				اسفالریت	کم	۱-۵۰	–	–	–	–	–	–	–	–
	M4	۳۳۰	۲/۸	۰/۰۸	۳۲۷	۳۴۲	۴				پیریت	کم	۱-۵۰	–	–	–	–	–	–	–	–
	M18	۳۰۰	۰/۲	۰/۰۸	۹۵/۷	۴۴۴	۸														
۱۲	M5	۸۰	۱/۳	۰/۰۴	۶۲	۲۹/۶	۵۱	R9A R11 R12	برشی	گالن زمینه				–	–	–	–	–	–	–	–
	M6	۳۵	۰/۲	۰/۰۶	۸۸	۳۳/۳	۳			ادخال	فاهلور	کم	۱-۵۰	–	–	–	–	–	–	–	–
	M7	۱۳۱۵	۹۵/۲	۰/۰۶	۴۱۰	۲۸۹	۴۸۳۰				اسفالریت	متوسط‌تازیاد	۱-۱۰۰	–	–	–	–	–	–	–	–
۲۰	M8	۲۴۱۰	۳۲۸	۰/۰۶	۱۶۸۰	۲۵۳	۲۶۲	V3 V11 V14C 68	قشری	گالن زمینه				n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
	M9	۱۹۱۰	۱۶/۲	۰/۰۳	۴۵۶	۲۱۱	۴۳			ادخال	فاهلور	بسیار زیاد	۱-۳۰۰	–	–	–	–	–	–	–	–
											*اسفالریت	متوسط	۱-۱۰۰	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	۷۱/۷	n.d	۱۳/۱
											دولومیت	کم	۱-۵۰	–	–	–	–	–	–	–	–
											پیریت	بسیار کم	۱-۵۰	–	–	–	–	–	–	–	
۲۱	M10	۲۶۰۰	۲۱۰	۰/۲۲	۲۴۹۰	۱۸۵	۳۱	103 R3 R13 R16	قشری	گالن زمینه				n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
	M11	۱۱۳۰	۲۹۴	۰/۲۱	۵۰۸	۵۲۳	۱۵۳			ادخال	*فاهلور	زیاد	۱-۳۰۰	۳۹/۱	۴/۳	n.d	۲۳/۱	n.d	۳۹/۱	n.d	n.d
											اسفالریت	متوسط	۱-۱۰۰	–	–	–	–	–	–	–	–
											*کالکوپیریت	کم	۱-۵۰	n.d	۱۹/۶	n.d	۳۰	۹/۱	۰/۰۶	n.d	۱/۷
											پیریت	کم	۱-۵۰	n.d	n.d	n.d	۰/۷	۴۱	۱۳/۱	n.d	n.d
۲۴	M12	۱۲۱۰	۱۶/۹	۰/۲۶	۳۶۳	۸۲/۴	۲	104 70	قشری	گالن زمینه				n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
	M13	۱۶۶۰	۱۹۹	۰/۰۷	۱۰۳	۱۱۰۰	۱۵			ادخال	فاهلور	بسیار زیاد	۱-۴۰۰	۱۱/۵	۱/۵	n.d	۷/۸	n.d	n.d	n.d	n.d
	M19	۱۸۷۵	۱۹۷	۰/۱	۱۵۲	۱۰۷۰	۲۴				اسفالریت	بسیار کم	۱-۵۰	–	–	–	–	–	–	–	–
	M20	۱۷۶۷	۴۱۷	۰/۰۹	۲۵۰	۸۴۸	۳۲														
۲۶	M14	۶۵۰	۱/۹	۰/۰۴	۱۴۱	۱۶۹	۴	V17A V17B	برشی	گالن زمینه				n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
										ادخال	فاهلور	کم‌تا متوسط	۱-۵۰	–	–	–	–	–	–	–	–
											دولومیت	کم	۱-۵۰	–	–	–	–	–	–	–	–
۳۳	M15	۹۸	۳۰/۳	۰/۰۵	۱۸۵	۵۸/۳	۲۴۲	R20 V6 R19	برشی	گالن زمینه				n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
										ادخال	*اسفالریت	متوسط	۱-۲۰۰	n.d	۰/۲	n.d	n.d	n.d	۵۱/۶	n.d	۲۶/۱
											فاهلور	کم	۱-۵۰	–	–	–	–	–	–	–	–
											دولومیت	بسیار کم	۱-۵۰	–	–	–	–	–	–	–	–
۳۴	M16	۱۰۲	۰/۵	۰/۰۸	۱۵۲	۹۸/۷	۲۶	R22 R17	برشی	گالن زمینه				–	–	–	–	–	–	–	–
										ادخال	اسفالریت	متوسط	۱-۱۰۰	–	–	–	–	–	–	–	–
											فاهلور	کم	۱-۵۰	–	–	–	–	–	–	–	–
۳۵	M17	۲۰۵	۱۲/۹	۰/۲۱	۴۶۵	۱۵۴	۴۹	R7 R5 R8 R5A	برشی	گالن زمینه				n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
										ادخال	*فاهلور	کم‌تا متوسط	۱-۵۰	۱۴/۱۱	۳/۳۳	n.d	۱۷/۵	n.d	۴۶	n.d	n.d
											اسفالریت	کم	۱-۵۰	–	–	–	–	–	–	–	–
											پیریت	بسیار کم	۱-۵۰	–	–	–	–	–	–	–	–
میانگین عناصر		۹۳۲	۹۱	۰/۱	۴۲۲	۳۴۲	۲۹۶														



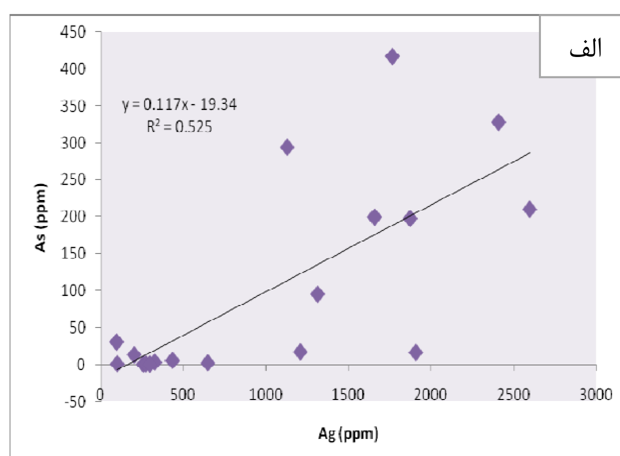
شکل ۸ نمودارهای آنالیز نقطه‌ای. الف: فاهلور؛ ب: اسفالریت.

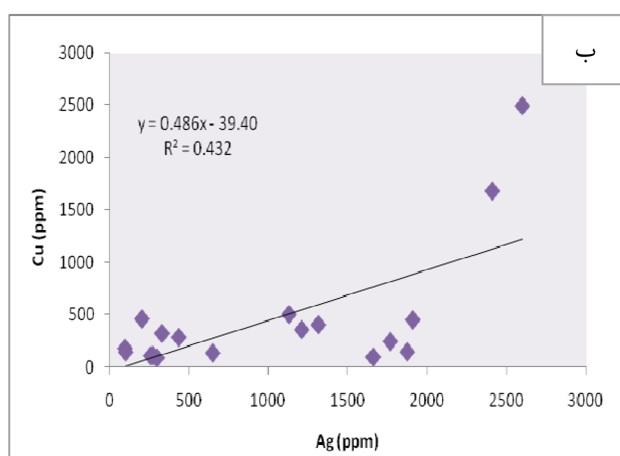
نسبت معرف Sb/Bi در گالن نشان‌دهنده‌ی شرایط تشکیل کانی سازی بوده؛ به طوری که نسبت کمتر از ۰٫۶ بیانگر شرایط دما و فشار بالا و نسبت بیش از ۶ تا ۱۳ نشاندهنده شرایط دما و فشار پایین است [۴]. در گالن نخلک این نسبت (۳۴۲۶) بسیار بالا بوده و دلیل آن مقدار بسیار پایین بیسموت است که گالن نخلک از نظر عناصر شاخص و نیز نسبت معرف Sb/Bi با چند نمونه گالن از انواع مختلف کانسارها مقایسه شده است (جدول ۳). در کانسارهای وابسته‌به ماگماتیسم، بیسموت بالایی دارد و برعکس با کاهش ارتباط با ماگماتیسم، مقادیر بیسموت کاهش می‌یابد. کانسار نخلک از نظر فراوانی عناصر و نسبت معرف شباهت زیادی به کانسارهای نوع دره می‌سی‌سی‌پی نشان می‌دهد.

جدول ۳ مقدار میانگین عناصر نقره، آرسنیک، بیسموت و آنتیموان و نسبت Sb/Bi گالن (کل) نخلک و دیگر کانسارها.

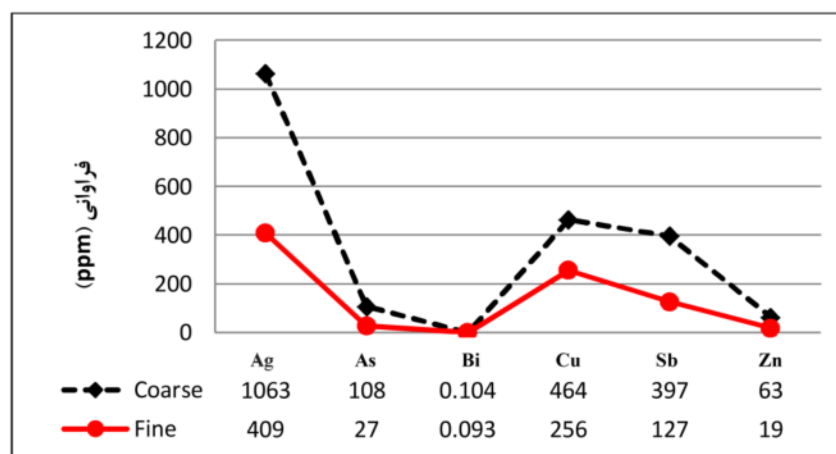
نام کانسار	نوع کانسار	Ag(ppm)	As(ppm)	Bi(ppm)	Sb(ppm)	Sb/Bi	مراجع
Nakhlak	**MVT**	**۹۳۲٫۳**	**۹۱٫۴**	**۰٫۱**	**۳۴۲٫۶**	**۳۴۲۶**	
Fankou	MVT	۱۶۴۰	۵۰۰	۱۲۰	۱۲۱۰	۱۰٫۰۸	[۴۰]
Illinois-Kentucky	MVT	۱۴۹	۲۳۴	۱۳۹	۸۱۳	۵٫۸	[۴۱]
Missouri SE	MVT	۸۵	۳۴۰	۵۰	۱۷۱	۳٫۴	[۴۱]
Wisconsin- Illinois	MVT	۱۵٫۷	-	۱	۲۸۳	۲۸۳	[۴۱]
Tri- State	MVT	۱۱٫۲	-	۵۲	۴۹	۰٫۹	[۴۲]
Silesia	MVT	۱۷۳	۶۰۹	۱۰	۲۱۳	۲۱٫۳	[۴۳]
Berg Aukas	MVT	۵۲۱	-	-	۲۲۰		[۴۴]
Abenab	MVT	۳۲۰	-	-	۱۸۱		[۴۴]
Silver mines	Irish type	۵۰۰	-	-	۸۰۰		[۴۵]
Darwin	Sedex	۱۸۸۵۵	-	۴۴۴۵۶	۴۶۴	۰٫۰۱	[۴۶]
British Island	Syngenetic galena	۱۰	-	۰٫۰۰۰۱	۸	۸۰۰۰۰	[۴۰]
Broken Hill	Metamorphosed Sedimentary	۶۱۸	-	۱۳۵	۱۰۱۰	۷٫۳	[۴۷]
Shuikoushan, China	Skarn- hydrothermal	۱۰۷۶	۲۷۲	۸۶۰	۱۵۸۰	۱٫۸	[۴۰]
Qaleh Zari	IOCG	۲۳۹۲۵	-	۳۱۳۵۰	-	-	[۴۸]

با توجه به فراوانی عناصر در گالن کل، نقره با آرسنیک همبستگی مثبت و بالا (۰/۷۲۵) و با مس همبستگی مثبت متوسط (۰/۶۵۷) دارد (شکل ۹). آرسنیک و مس به همراه آنتیموان عناصر سازنده‌ی کانی‌های سری تترائدریت-تنانتیت است. با توجه به اینکه نقره با آرسنیک همبستگی بیشتری نسبت به آنتیموان (۰/۳۵۵) نشان می دهد، احتمالاً نقره بیشتر در تنانتیت ($Cu_{12}As_4S_{13}$)، تمرکز یافته است. آنتیموان گالن نخلک از چند نظر جالب توجه است: ۱) حضور در آنالیز کل گالن (ppm ۳۴۲)؛۲) عدم حضور در ادخال‌ها و ۳) همبستگی پایین بین آنتیموان و نقره. این شواهد می توانند بدین سبب باشند که آنتیموان به صورت محلول جامد و با تمرکز پایین در گالن زمینه پراکنده شده است. عدم شناسایی آنتیموان با آنالیز نقطه‌ای در گالن زمینه احتمالاً به دلیل پایین‌تر بودن فراوانی این عنصر از حد تشخیص روش آنالیزی بوده است. گالن نخلک از نظر اندازه به دو صورت درشت بلور و ریز بلور قابل مشاهده است. نمودار مقایسه‌ی ترکیب ژئوشیمیایی میانگین این دو نوع گالن در شکل (۱۰) آورده شده است. بطور کلی هماهنگی خوبی بین عناصر فرعی دو نوع گالن وجود داشته با این حال در گالن‌های درشت بلور عناصر کمیاب از فراوانی بالاتری برخوردار است. علت این تفاوت در ژئوشیمی گالن درشت و ریز بلور را می‌توان در کانی نگاشت‌های آنها جستجو کرد که بطور کلی گالن‌های درشت بلور نسبت به ریز بلور، فراوانی بیشتر ادخال و اندازه‌ی ادخال بزرگتر دارند.





شکل ۹ همبستگی بین زوج عناصر درون گالن کل. الف: نقره-آرسنیک؛ ب: نقره-مس.



شکل ۱۰ مقایسه‌ی مقدار میانگین فراوانی عناصر در گالن کل درشت و ریز بلور کانسار نخلک.

برداشت

گالن مهمترین کانه‌ی کانسار نخلک بوده و به تنهایی حدود ۹۹ درصد از ماده‌ی معدنی سولفیدی را تشکیل می‌دهد. این کانی از نظر خصوصیات بلورشناسی، کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی مورد بررسی قرار گرفته است. بلورشناسی گالن نخلک نشان می‌دهد که این کانی بیشتر به شکل کوبو-اکتاهدرال و با رخ یا جداشدگی کوبیک بوده که نشان‌دهنده‌ی تشکیل در دمایی پایین است. مهمترین خصوصیت کانی‌شناسی کانسار نخلک علیرغم سادگی پاراژنزی، حضور ادخال‌های اسفالریت، پیریت، کالکوپیریت و فاهلور (سری تترائدریت-تنانتیت) درون گالن هستند. فراوانی و تنوع ادخال‌ها در تمامی نمونه‌ها یکسان نبوده و تغییرات نسبی نشان می‌دهد. گالن نخلک در مرحله‌ی پرکننده‌ی فضای خالی در سه فاصله زمانی ته نشست شده که فراوانی ادخال‌ها در گالن‌های پایانی بیشتر است. کانی گالن قادر است علاوه بر سازنده‌های اصلی خود (Pb, S)، عناصر دیگری همچون نقره، آنتیموان، بیسموت، آرسنیک، روی، کادمیوم، سلنیوم و مس را به صورت جزئی در خود جای دهد. نتایج آنالیزهای ژئوشیمیایی (گالن کل به روش ICP-MS و آنالیزهای نقطه‌ای به روش XPMA) نشان می‌دهند که عناصر مهمی مانند Ag، Sb، As و Cu در گالن نخلک حضور دارند. این عناصر فرعی عمدتا به صورت ادخال کانی‌های مستقل و کمتر به‌صورت محلول جامد درون گالن حضور دارند؛ چراکه حضور این عناصر در آنالیز نقطه‌ای به اثبات رسیده و نیز بین فراوانی و نوع ادخال و ژئوشیمی کل گالن رابطه‌ی مستقیمی مشاهده می‌شود. عنصر بیسموت در ژئوشیمی کل گالن مقدار بسیار پایینی (۰٫۱ ppm) بوده و در کانی‌های ادخال نیز این عنصر یافت نشد، که این عدم حضور می‌تواند خود دلیلی بر عدم ارتباط با ماگماتیسم باشد. مقادیر بسیار پایین Bi و فراوانی Sb و As و نیز نسبت بالای Sb/Bi نشان دهنده تشکیل گالن نخلک در دما و فشار پایین است. همبستگی بالای بین نقره با آرسنیک و نیز نقره با مس نشان از حضور این عناصر در یک کانی به صورت ادخال‌های فاهلور غنی از نقره است. خصوصیات کانی‌شناسی گالن نخلک در دما و فشار پایین تشکیل و در رده‌ی کانسارهای نوع دره‌ی می‌سی‌سی‌پی قرار می‌گیرد.

قدردانی

این مقاله مربوط به طرح پژوهشی به شماره ۳/۲۲۷۳۴ مورخ ۱۳۹۱/۴/۱۳ در دانشگاه فردوسی مشهد است.

مراجع

[1] Hallier U.W., "*Fort, Atashgah und Chahar Taq von Nakhlak. Überreste einer sasanidischen Bergbausiedlung*" AMI, N.F. 5 (1972) 285-307.

[2] Harper P. O., Meyers P., "*Silver Vessels of the Sasanian Period: Royal imagery*", Metropolitan Museum of Art, published in association with Princeton University Press (1981) 256 p.

[3] Vanhook H.j., "*The ternary system Ag_2S-Bi_2S_3-PbS*", Economic Geology 55 (1960) 759- 788.

[4] Malakhov A. A., "*Bismuth and antimony in galenas as indicators of some conditions of ore formation*", Geochemistry International 7 (1968) 1055-1068.

[5] Foord E. E., Shawe D. S., "*Pb-Bi-Ag-Cu-(Hg) chemistry of galena and some associated sulfosalts. A review and some new data from Colorado California and Pennsylvania*", Canadian Mineralogist 27 (1989) 363- 382.

[6] Sharp T. G., Buseck P. R., "*The distribution of Ag and Sb in galena; inclusions versus solid solution*", American Mineralogist 78 (1993). 85-95.

[7] Hall W. E., Czamanske G, K., "*Mineralogy and trace element content of the Wood River lead-silver deposits, Blaine County, Idaho*", Economic Geology 67 (1977) 350- 361.

[8] Wu I., Peterson U "*Geochemistry of tetrahedrite and mineral zoning at Casapalca, Peru*", Economic Geology 72 (1977) 993- 1016.

[9] Moëlo Y., Makovicky E., Mozgova N. N., Jambor J. L., Cook N., Pring A., Paar W., Nickel E. H., Graeser S., Karup-Møller S., Balic-Žunic T., Mumme W. G., Vurro F., Topa D., Bindi L., Bente K., Shimizu M., "*Sulfosalts systematics: a review. Report of the sulfosalt sub-committee of the IMA Commission on Ore Mineralogy*", European Journal of Mineralogy 20 (2008) 7- 46.

[10] Karup-Møller S., "*Mineralogy of some Ag-(Cu)-Pb-Bi sulphide associations*", Bulletin of the Geological Society of Denmark 26 (1977) 41-68.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.1.3]

[11] Holzer H F., Ghassernipour R., *"Geology of the Nakhlak lead mine area (Anarak district Central Iran) "* , Geological Survey of Iran (1969) 44 p.

[12] Cherepovsky N., Plyaskin V ., Zhitiner N., Kikorin V U., Susov M., Melnikov B., Aistov L., "*Report on detailed geological prospecting in Anarak area (Central Iran) Nakhlak locality"*., Geological Survey of Iran and Technoexport Co.(USSR) 14 (1982) 196 p.

[13] Romanko E., Kokorin Y U., Krivyakin B., Sosov M., Morozov L., Sharkovski M., , "*Outline of metallogeny of Anarak area (Central Iran) "* , Technoexport Report 19 (1984) 143 p.

[14] Rasa I., *"Geologisch, Petrographische untersuchungen in der Blie_Lagerstaette Nakhlak "* , Zentraliran, Heidel. Geo. Abh Band 10 (1987) 191 p.

[۱۵] جزی م.ع.، شهاب‌پور ج.، "*بررسی خصوصیات کانی‌شناسی، ساختی، بافتی و ژئوشیمیایی معدن سرب نخلک، اصفهان*"، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، شماره ۲(جلد سوم)، (۱۳۸۹) ص ۱۳۱-۱۵۱.

[16] Alavi M., Vaziri S. H., Seyed-Emami K., Lasemi Y., "*The Triassic and associated rocks of the Nakhlak and Aghdarband areas in Central and Northeastern Iran as remnants of the Southern Turanian continental margin*", Geological Society of America Bulletin 109 No.12 (1997) 1563-1575.

[17] Vaziri S. H., Fursich F. T., Kohansal-ghadimvand N., "*Facies analysis and depositional environments of the Upper Cretaceous Sadr unit in the Nakhlak area, Central Iran*", Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 29 (2012) 384-397.

[18] Shahabpour J., "*Feedback Concept in the Ore-forming Systems*", Resource Geology 60 (1) (2010)109-115.

[19] Ghazban F., Mcnutt R. H., Schwarcz H. P., "*Genesis of sediment- hosted Zn-Pb-Ba deposits in the Irankuh district, Esfahan Area, West- Central Iran*", Economic Geology 89 (1994) 1262-1278.

[20] Bonev I. k., "*Crystal habit of Ag-, Sb- and Bi-bearing galena from the Pb-Zn ore deposits in the Rhodope Mountains*", Geochemistry, Mineralogy and Petrology Sofia 45 (2007) 1-18.

[21] Hagni R. D., "*Origin of platy galena in the Viburnum Trend, southeast Missouri*", GSA North-Central Section 47th Annual Meeting (2013).

[22] Hagni R. D., Trancynger T. C., "*Sequence of deposition of the ore minerals at the Magmont mine, Viburnum Trend, Southeast Missouri*", Economic Geology 72 (1977) 451-464.

[23] Marshal R. R., Joensuu O., "*Crystal habit and trace element content of some galena*", Economic Geology 56 (1961) 758-771.

[24] Leach D. L., Sangster D. F., Kelley K. D., Large R. R., Garven G., Allen C. R., Gutzmer J., Walters S. S., "*Sediment-Hosted lead-zinc deposits: A Global Perspective*", Economic Geology, 100th Anniversary volume (2005) 501-607.

[25] Wahlstrom E. E., "*Octahedral parting on galena from Boulder County, Colorado*", American Mineralogist 22 (1984) 906-911.

[26] Marie J S., Kesler S E., *"Iron-Rich and Iron-Poor Mississippi Valley-Type Mineralization, Metaline District, Washington "*, Economic Geology 95(2000) 1091-1106.

[27] Ramdohr p., "*The Ore Minerals and their Intergrowths*", Peragmon Press, 1207 p.

[28] Jeffrey C. A., "*Supergene processes in galena-replacement mineralization from the Longstone Edge vein system, Derbyshire*", Proceedings of the Yorkshire geological society 53 (2001) 197-206.

[29] Szczerba M., Sawlowicz Z., "*Remarks on the origin of cerussite in the Upper Silesian Zn-Pb deposits, Poland*", Mineralogia 40 (2009) 53-64.

[30] Takahashi T., "*Supergene alteration of Zinc and Lead deposits in limestone*", Economic Geology 55 (1960) 1083-1115.

[31] Goldschmidt V. M., "*Geochemistry*" Oxford University Press, London, (1954) 407p.

[32] Guilbert J. M., Park Jr. C. F., "The Geology of Ore Deposits", Freeman and Company, New York (1997) 985 p.

[33] Williams S. A., "*The Significance of Habit and Morphology of Wulfenite*", The American Mineralogist 51 (1966) 1212-1217.

[DOR: 20.1001.1.17263689.1395.24.1.1.3]

[۳۴] عمیقیان ج.، علوی م.، "*بررسی شیمیائی و کریستالین بطور طبیعی ولفینیت معدن نخلک انارک*"، مجله علوم دانشگاه تهران، شماره ۳- ۴ (۱۳۵۹) ص ۴۹-۵۳.

[35] Won K. J., "*Direct acid leaching of zinc from marmatite ores*", Journal of the Korean Chemical Society 11 (1) (1967) 38-43.

[36] Karavaiko G. I., "*Microbiological processes for the leaching of metals from ores, State-of -the-art review*". In A.E. Torma (Ed .), United Nations Environment Programme, USSR commission for UNEPMoscow, Center of International Projects, GKNKT. (1985) 62-69.

[37] da Silva G., Lastra M. R., Budden J. R., "*Electrochemical passivation of sphalerite during bacterial oxidation in the presence of galena*", Minerals Engineering 16(3) (2003) 199-203.

[38] Loftus-Hills G., Solomon M., "*Cobalt, nickel and selenium in sulphides as indicators of genesis*", Mineralium Deposita 2 (1967) 228-242.

[39] Heyl A. V., "*Geologic characteristics of three major Mississippi Valley districts*", In: Kisvarsanyi G, Grant SK, Pratt WP, Koenig JW (eds.) International conference on Mississippi Valley type lead-zinc deposits, proceedings volume. University of Missouri-Rolla Press, Rolla, (1983) 27-60.

[40] Song X., "*Minor elements and ore genesis of the Fankou lead-zinc deposit, China*", Mineralium Deposita 19 (1984) 95-104.

[41] Hall W E., Heyl A V., "*Distribution of minor elements in ore and host rock, Illinois-Kentucky fluorite district and Upper Mississippi Valley zinc-lead district*", Economic Geology 63 (1968) 655-670.

[42] Hagni R D., "*Minor elements in Mississippi Valley-Type ore deposits. In: Shanks, W.C. (Ed.), Cameron volume on unconventional mineral deposits*", American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Society of Mining Engineers, New York (1983) 71- 88.

[43] Haranczyk C., "*Development of the Variscan mineral paragenesis in Poland*", Freiberger Forschungshefte, Reihe C: Geowissenschaften, Mineralogie-Geochemie 354 (1979) 7-17

[44] Emslie D P., Beukest G J., "*Minor- and trace-element distribution in sphalerite and galena from the Otavi Mountainland, South West Africa*", Annals of the Geological Survey, Republic of South Africa 15 (1981) 11-28.

[45] Zakrzewski M A., "*Members of the freibergite–argentotennantite series and associated minerals from Silvermines, County Tipperary, Ireland*", Mineralogical Magazine 53(1989) 293-298.

[46] Czamanske G. K., Hall W. E., "*The Ag-Bi-Pb-Sb-S-Se-Te mineralogy of Darwin lead-silver-zinc deposit, Southern California*", Economic Geology 70 (1975) 1092-1110.

[47] Both R A., "*Minor element geochemistry of sulphide minerals in the Broken Hill lode (NSW) in relation to the origin of ore*", Mineralium Deposita 8 (1973) 349-369.

[۴۸] کریم‌پور م. ح.، لارج ر. ر.، رزم‌آرا م.، پاتریک ر. ا. د.، "*کانی‌های سولفوسالت بیسموت و پاراژنز آنها در کانسار Cu-Ag-Au غنی از اسپیکیولاریت قلعه‌زری (ایران)*" ، مجله بلور شناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۲ (۱۳۸۴) ص ۴۱۷-۴۳۲.